

М. С. Калиенко^{1, 2*}, А. В. Желнина^{1, 2}

¹ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА», г. Верхняя Салда

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

* *kamak85@rambler.ru*

МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПОСЛЕ ВЫДЕРЖКИ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Исследованы листы из титановых сплавов VT20, VT25U и Ti6242S после отжига 560 °С – 1000 часов в воздушной атмосфере. Проведено испытание на растяжение при комнатной температуре окисленных образцов и фрактографическое исследование их поверхности и изломов. Обнаружены особенности разрушения? характерные для каждого из рассмотренных сплавов.

Ключевые слова: окисление, титановый сплав, излом, трещины.

M. S. Kalienko, A. V. Zhelnina

ROOM TEMPERATURE FRACTURE PROCESSES OF TITANIUM ALLOYS FOLLOWING ELEVATED TEMPERATURE EXPOSURE

In this work, samples from titanium alloys VT20, VT25U and Ti6242S exposed to laboratory air at 560 °C for 1000 h. The specimens with oxygen-enriched layer used for mechanical testing and then investigated by fractography.

Keywords: ti alloy, oxidation, fracture, cleavage facets.

Титановые сплавы уникальны, прежде всего, благодаря двум своим свойствам: высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Это позволяет успешно применять их в аэрокосмическом секторе, химической промышленности, медицине и спорте. Наиболее широко титановые сплавы используются в авиа- и двигателестроении.

Изменение ряда механических свойств титановых сплавов из-за сравнительно низкого сопротивления окислению и газонасыщения поверхности является одной из основных причин, ограничивающих использование титановых сплавов при повышенных температурах. При температурах выше 400 °С титан начинает активно взаимодействовать с атмосферными газами, в результате чего металл окисляется, образуется газонасыщенный слой. Образовавшийся газонасыщенный слой представляет собой твердый раствор внедрения кислорода в титане, имеет

высокую твердость и хрупкость, пониженную пластичность и вязкость, снижает усталостную прочность [1–4].

В настоящее время компоненты гражданских турбореактивных двигателей сделанные из титана сравнительно мало находятся при максимальной температуре их эксплуатации (активного газонасыщения) во время одного стандартного полета самолета. Но если сложить эти короткие периоды, то “набегают” сотни часов в течении всей жизни самолета, за которые на поверхности титанового сплава формируется окисел и газонасыщенный слой. Для того чтобы увеличить максимальную рабочую температуру титановых сплавов в турбореактивном двигателе, необходимо понимание влияния физических процессов окисления и образования газонасыщенного слоя на механические свойства и механизмы разрушения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе исследовали листы из титановых сплавов BT20, BT25Y и Ti6242S производства ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» в состоянии после отжига. Коэффициенты K_{β} и $Al_{\text{ЭКВ}}$ сплавов представлены в табл. 1. Для исследования механических свойств использовали стандартные образцы с рабочей частью 12 x 50 мм. Образцы для испытаний на растяжение были изготовлены на электроискровом станке. После вырезки образцы были дополнительно потравлены со съемом 0,02 мм для удаления оплавленного бокового слоя. Перед отжигом все образцы были обезжирены бензином и промыты этиловым спиртом.

Изотермический отжиг образцов от листов проводился при температуре 560 °С в течение 1000 ч. Термическую обработку осуществляли в электрической лабораторной печи объемом 0,5 м³ с вентилятором для перемешивания воздуха и точностью поддержания температуры 5 °С.

Электронно-микроскопические исследования проводились на РЭМ Quanta 3D FEG. Снимки микроструктуры, полученные в обратнорассеянных и во вторичных электронах.

Таблица 1

Коэффициенты K_{β} и $Al_{\text{ЭКВ}}$ титановых сплавов

	K_{β} -сплава	$Al_{\text{СТР. ЭКВ}}$
BT20	0,17	7,5
Ti6242S	0,19	8,5
BT25Y	0,38	8,7

Механические свойства листов из титановых сплавов представлены в табл. 2. У сплава Ti6242S наблюдается существенное снижение

относительного удлинения после отжига 560 °С – 1000 ч, сплав ВТ25У разрушается хрупко. Данное снижение пластичности связано с состоянием поверхности металла, т. к. на полированных образцах сплава ВТ25У пластичность на уровне исходного состояния.

Таблица 2

Результаты механических испытаний на растяжение при температуре 25 °С

	Исходные образцы		Образцы с окислом		Полированные образцы	
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %
ВТ20	1044	13,0	1117	11,9	–	–
Ti6242S	1011	14,0	1030	6,6	–	–
ВТ25У	1204	12,1	хр. разр.	–	1247	13,1

На рисунке представлены изображения полученные в режиме обратнорассеянных электронов, отображающие особенности деформации поверхности сплавов вблизи изломов в плоскости листов. У сплавов ВТ20 и Ti6242S при испытании на растяжение в рабочей зоне образцов образуются трещины, ориентированные перпендикулярно направлению нагружения и имеющие, как следствие, максимальное раскрытие на поверхности после разрушения образцов. У сплава ВТ20 в сравнении с Ti6242S наблюдается больше поперечных трещин, трещины расположены на меньшем расстоянии друг от друга. Помимо этого у сплава ВТ20 имеющего максимальное относительное удлинение просматривается сетка вторичных трещин ориентированных под углом близким к 45 ° относительно оси нагружения, и наблюдается активное сопутствующее отслаивание окарины в данных направлениях (рис. в). Наличие трещин и отслаивание окарины в направлении около 45° относительно оси нагружения свидетельствуют о том, что деформация поверхности частично осуществляется за счёт сдвига в данном направлении, о чем свидетельствует наличие линий скольжения на поверхности в местах свободных от окарины (рис. г). У сплава ВТ25У трещины исходят от очага излома, имеют извилистую траекторию распространения. На расстоянии более 800 мкм от излома трещин у сплава ВТ25У не наблюдается, в то время как у других сплавов они присутствуют на всей рабочей части образцов. Сплав ВТ25У разрушается хрупко на упругом участке нагружения. Следовательно, наблюдаемые на его поверхности трещины являются вторичными трещинами и сплав разрушается при появлении первичной трещины, которая раскрывается и разрушает образец. Таким образом, наблюдаемое максимальное относительное удлинение у сплава ВТ20 обеспечивается за счёт максимальная пластичность поверхностного слоя среди рассмотренных сплавов, а именно достаточно большого

количества поперечных поверхностных трещин и сдвиговой деформации поверхностного слоя.

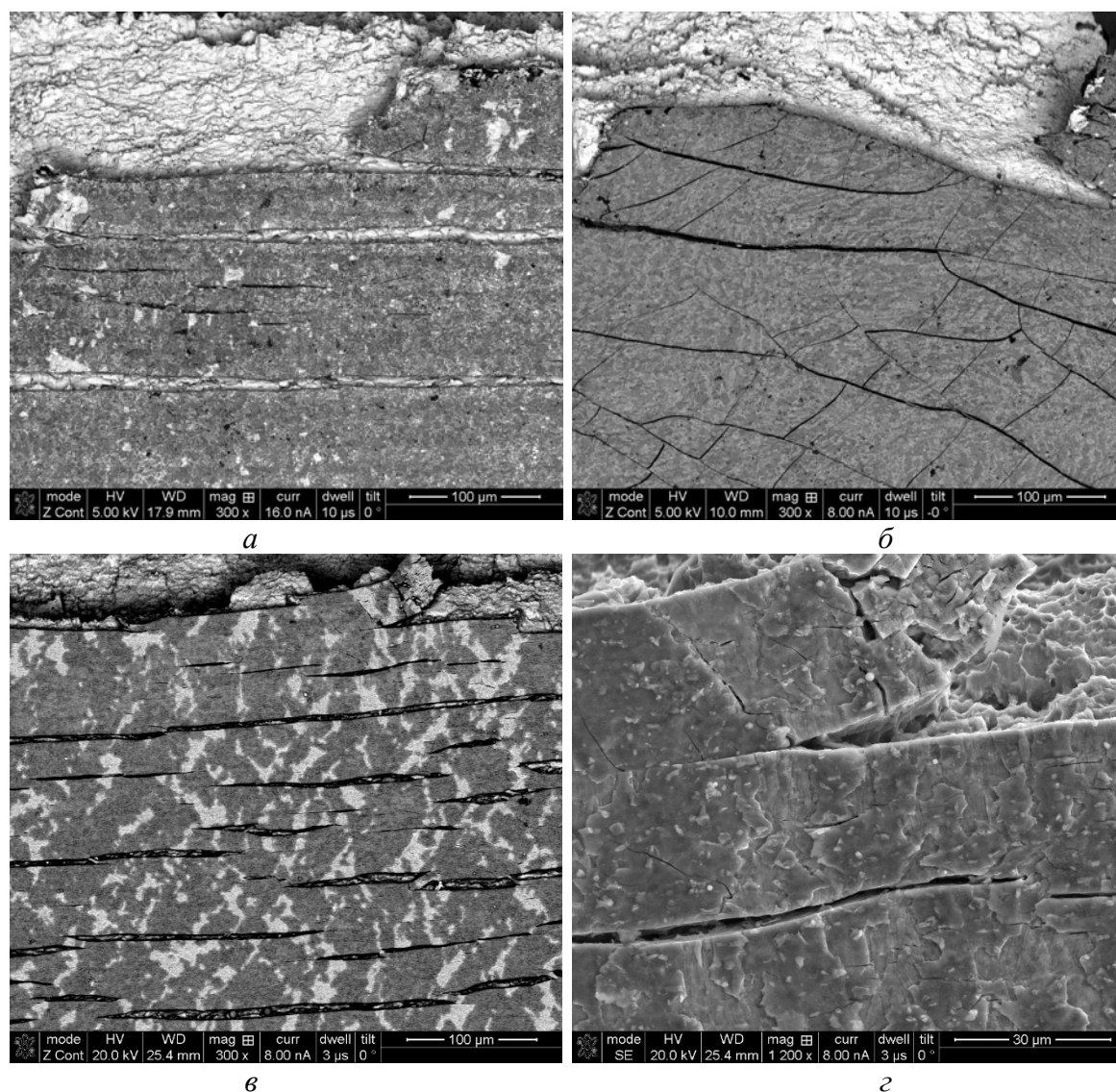


Рис. Поверхность образцов после отжига 560 °С – 1000 ч – воздух и испытания на растяжение: а – Ti6242S; б – VT25Y; в, г – VT20

На пластическом участке деформации образцов VT20 и Ti6242S этап разрушения сводится к факту нелокализованного накопления стабильных микротрещин по всей поверхности нагруженного образца. Причины стабилизации начальных трещин на данный момент не ясны. Возможно, стабилизация связана с пластической релаксацией в вершинах имеющихся трещин, препятствующей локализации разрушения. На втором этапе разрушения происходит переход от нелокализованного разрушения к локализации и разрыву образцов. В основе разрушения твердых сред лежит множественное накопление стабильных зародышевых трещин. Факт прохождения на данных сплавах фазы нелокализованного разрушения

является очевидным. Более того, он противоречит чисто механической картине разрушения, в которой даже малый дефект является концентратором напряжений, следовательно, было бы вправе ожидать, что процесс трещинообразования должен был бы быть локализован возле образовавшихся малых трещин. У сплава ВТ25У возникновение концентратора напряжений на упругом участке растяжения, очевидно, приводит к локализованному разрушению – разрыву образца. Для детального даже качественного описания разрушения, которое, как известно, заканчивается разделением тела на части, то есть распространением одной или нескольких трещин, следует ответить на следующий закономерный вопрос: почему у сплавов ВТ20 и Ti6242S наблюдается нелокализованное накопление стабильных микротрещин и каким образом осуществляется переход от нелокализованного разрушения к росту магистральной трещины, приводящей к заключительной фазе разрыва при испытании на растяжение. Ответ на этот вопрос без сомнения представляется весьма интересным и полезным, поэтому мы продолжим исследования в данной области в наших дальнейших работах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в работе исследования выявили особенности разрушения образцов от листов из жаропрочных титановых сплавов Ti6242, ВТ20, ВТ25У после длительного отжига в воздушной атмосфере 560 °С – 1000 ч. Рассмотрено изменение механических свойств сплавов при испытании на растяжение после длительного отжига. Обнаружено различное снижение относительного удлинения окисленных образцов, от хрупкого разрушения сплава ВТ25У до 11,9 % относительного удлинения у сплава ВТ20. Получены новые данные о механизмах разрушения рассмотренных титановых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солонина О. П. Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы / О. П. Солонина, С. Г. Глазунов. Москва : Металлургия, 1976. 448 с.
2. Пульцин Н. М. Взаимодействие титана с газами / Н. М. Пульцин. Москва : Металлургия, 1969. 216 с.
3. Лазарев Э. М. Окисление титановых сплавов / Э. М. Лазарев, З. И. Корнилова, Н. М. Федорчук. Москва : Наука, 1985. 140 с.
4. Калиенко М. С., Волков А. В., Желнина А. В., Русаков К. А. Проблемы оценки газонасыщения в титановых сплавах при максимальных температурах эксплуатации // XV Международная конференция «Ti-2016 в СНГ». Санкт-Петербург. 2016.